

Viaducto de Montabliz

The Montabliz viaduct

Roberto Villegas Gómez. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director de Obra Ministerio de Fomento. rvillegas@fomento.es

Marcos J. Pantaleón Prieto. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

APIA XXI, S.A., Santander, España. lsaez@apiaxxi.es

Roberto Revilla Angulo. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

APIA XXI, S.A., Santander, España. rrevilla@apiaxxi.es

Patricia Olazábal Herrero. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

APIA XXI, S.A., Santander, España. polazabal@apiaxxi.es

Resumen: El presente artículo describe el diseño, proyecto y construcción del Viaducto de Montabliz, que permite el paso de la Autovía de la Meseta sobre el valle del río Bisueña en la provincia de Cantabria. Sus 130 m de altura de pila, la mayor de España y entre las 6 mayores de Europa, sus 175 m de luz en el vano central, construidos mediante la técnica de avance en voladizo, y el diseño de su sección transversal, resuelta mediante cajón único para las dos calzadas, con anchura de plataforma de 26.1 m, hacen de la solución proyectada una estructura muy singular.

Palabras Clave: Viaducto, Avance en voladizo, Pila, Tablero

Abstract: The article describes the design, planning and construction of the Montabliz Viaduct which takes the Meseta Motorway over the valley of the River Bisueña in the province of Cantabria. The viaduct has a pier height of 130 m pier making it the highest in Spain and among the six highest in Europe, and this together with its 175 m long central span, built by cantilevered construction, and the design of the cross-section in single box form for the two roadways, with a platform width of 26.1 m, all make this a unique structure.

Keywords: Viaduct, Cantilevered construction, Pier, Deck

1. Introducción

La Autovía de la Meseta, construida por el Ministerio de Fomento, es el principal acceso de gran capacidad que tiene la comunidad de Cantabria con el centro peninsular. Se trata de una vía de doble calzada y sentido de circulación que, al atravesar un marco geográfico de tal belleza y de tan difícil orografía, como es la Cordillera Cantábrica, hace que su construcción presente una gran complejidad técnica y medioambiental.

El profundo valle en el que se encuadra el viaducto, se encuentra situado entre las localidades de Bárcena de Pie de Concha y Pesquera, y se caracteriza por presentar los elementos típicos de los valles cantábricos: es decir, un valle fluvial en "V", con pendientes muy abruptas, escasez de terrenos llanos y vaguadas estrechas.

2. Diseño formal

El viaducto se sitúa en un enclave de amplia visibilidad y de especial naturaleza medioambiental y paisajística, lo que ha exigido un diseño singular de su estructura, y un gran respeto a los valores ambientales contenidos en los espacios naturales del entorno. La definición de su tipología, geometría y proceso constructivo, se ha realizado de acuerdo a las especificaciones exigidas en la Declaración de Impacto Ambiental, que han condicionado en gran medida su diseño.

Al tratarse de una gran infraestructura que franquee un valle largo y profundo, en donde la utilización de cimbras convencionales la hace constructiva, ambiental y económicamente inviable, se llegó al convencimiento de que la solución más adecuada, era la de tipología en viga continua de hormigón pre-

Fig. 1. Vista general del Viaducto de Montabliz.



tensado construida mediante la técnica de avance en voladizos sucesivos.

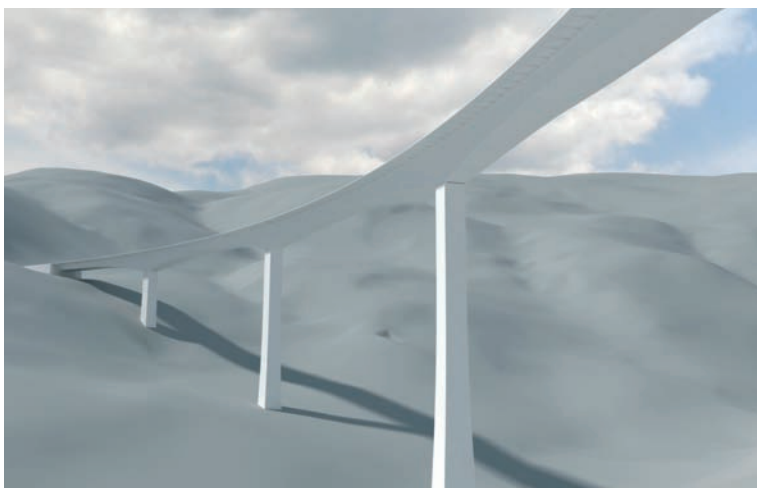
En definitiva, se trata de un gran viaducto de pilas altas y grandes luces, en donde la construcción mediante avance en voladizo se adapta particularmente bien y presenta grandes ventajas. De entre ellas cabe destacar la liberalización del espacio situado bajo la estructura, la reducción y optimización en la utilización de encofrados, limitados a la altura de las trepas de las pilas y a la longitud de las dovelas del tablero, el aumento del rendimiento de la mano de obra, debido a la industrialización de los trabajos mediante ciclos repetitivos, y la flexibilidad en la ejecución, ligada a la posibilidad de acelerar la construcción independizando actividades.

Con objeto de minimizar la afección en el fondo del valle sobre el bosque mixto de Montabliz, se ha proyectado la sección transversal con tablero de pila única, ya que el impacto que supondría una doble estructura paralela resultaría excesivo, y la ejecución de doble pila

conllevaría a ocupaciones de terreno muy superiores a la considerada. Se ha pretendido, en todo momento, la búsqueda de una imagen esbelta, evitando el exceso de solidez que resultaría un obstáculo para la transparencia del valle.

El resultado final que presenta la estructura es de una gran elegancia, fortaleza y de integración en el entorno; se trata, en definitiva, de una síntesis de robustez, en donde su poderoso alzado, a base de acusadas líneas de cantos variables en pilas y tablero, y su gran altura sobre el suelo, acentúan su fuerza. El aspecto monumental de la obra nace de la presencia de las pilas, que con sus aristas redondeadas, a base de superficies cilíndricas, junto con su doble curvatura en el alzado transversal y el longitudinal, quedan configuradas con un gran sentido espacial, y constituyen unos elementos fundamentales en la composición del conjunto.

Fig. 2. Vista general del alzado de pilas y tablero.



3. Diseño estructural

Se trata de un viaducto resuelto mediante una viga continua de hormigón pretensado, que utiliza la flexión longitudinal generalizada como mecanismo fundamental para resistir las cargas.

El peso propio junto con la carga permanente, dado el rango de luces del viaducto, aparte de ser las acciones fundamentales, pueden dar lugar a efectos secundarios, no linealidades geométricas y de material, siendo los más importantes los producidos por las deformaciones diferidas debidas a la retracción y a la fluencia en el hormigón y a la relajación en el acero de pretensado. Las sobrecargas de tráfico producen esfuerzos mucho menores, mientras que el viento, dada la altura

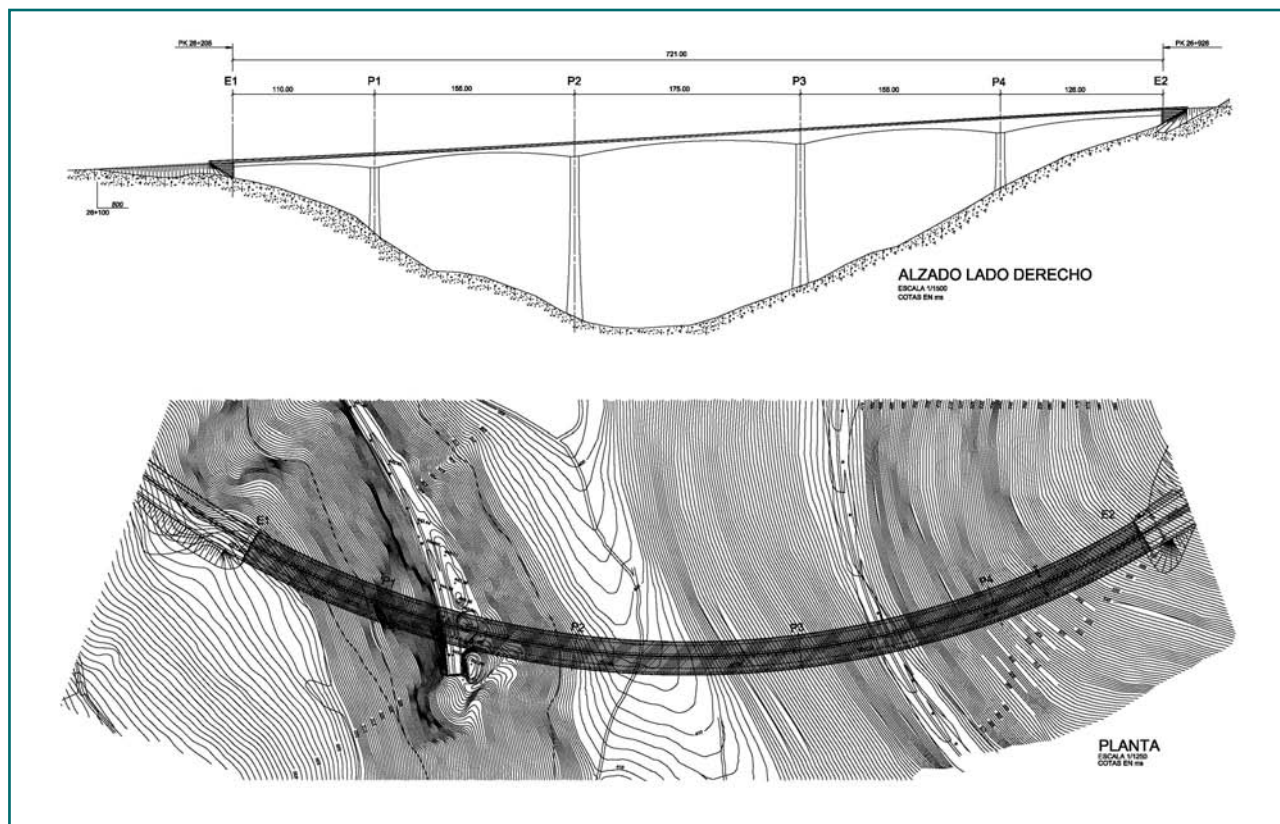


Fig. 3. Alzado longitudinal y planta del viaducto.

de las pilas centrales (mayores de 100 m) y la ubicación del viaducto (forma de valle en "V"), si bien no es determinante en la configuración del puente una vez terminado, sí que es decisivo durante su construcción, y por tanto, ha sido necesario examinarlo en detalle y realizar estudios específicos para su análisis.

La sección cajón definida en el tablero, y utilizada en los puentes de gran luz, no sólo es la más eficaz desde un punto de vista resistente, máxima resistencia a la flexión y a la torsión, sino que además es la tipología que mejor optimiza el peso y la distribución del material, obteniendo de esta forma, con el mínimo peso, un tablero muy ligero y resistente. Sus grandes cabezas superiores e inferiores la hacen apta para soportar grandes momentos flectores tanto positivos como negativos. Su condición de sección cerrada le confiere una gran rigidez a la torsión, alabeos pequeños y distorsión reducida, lo que le permite minimizar el espesor de sus paredes y soportar cargas descentradas, de forma mucho más satisfactoria que con una sección abierta, muy importante para la estabilidad estática y dinámica del tablero durante su construcción en avance en voladizo.

La sección transversal de las pilas está resuelta mediante una sección rectangular hueca de paredes del-

gadas, que es la habitualmente utilizada en los viaductos de gran altura, dado que, del mismo modo que la sección del tablero, tiene una gran rigidez a la torsión y a la flexión y un excelente radio de giro en ambas direcciones.

Dicha sección es la que mejor resiste los esfuerzos de flexión proporcionados por las cargas horizontales aplicados en la cabeza de la pila y a lo largo de su fuste cuando se cuenta con una gran compresión, como es el peso propio del viaducto. La pila es una ménsula, libre en construcción y empotrada en el tablero en servicio, en una cuantía menor o mayor en función de la forma del valle y rigidez de pilas y dintel, con comportamiento diferente según consideremos el cálculo longitudinal o transversal del viaducto.

Su geometría es variable en canto, longitud y anchura en función de su altura, ya que se ha buscado optimizar su comportamiento estructural y minimizar su exposición al viento, dado que es en las zonas medias y altas donde la velocidad del viento es más elevada, y su distancia a la base de las pilas es mayor. Dispone de aristas redondeadas de 0.5 m de radio, lo que ha permitido, debido a su aerodinamicidad, reducir de forma apreciable su coeficiente de arrastre.

4. Geología y Geotecnia de las cimentaciones

Esencialmente el sustrato rocoso sobre el que se cimenta el viaducto está constituido por materiales calcáreos de las Formaciones Jurásicas J1 y J2, por arcillas de las Facies del Keuper, y por areniscas y lutitas de la Formación Buntsandstein.

La Formación Calcárea J1 del Jurásico sobre la que descansan el estribo 1 y la pila 1 está formada por tramos calcáreos de roca resistente bien estructurada, por tramos de brecha calcárea poco cementada y por niveles de arenas densas y de arcillas muy firmes. Esto da lugar a que el terreno sea muy heterogéneo e irregular, tanto en planta como en profundidad. La cimentación del estribo 1 se realiza de forma superficial con una tensión admisible de 4.0 kp/cm². La cimentación de la pila 1 es profunda y consiste en un encepado tronco piramidal de 24 m de anchura, 24 m de longitud y canto variable de 2.75 a 5.5 m apoyado sobre 49 pilotes de 1.5 m de diámetro, distribuidos 7 en sentido transversal y otros 7 en sentido longitudinal, con separación entre ejes de pilotes de 3.6 m, y 30 m de profundidad máxima, siendo ésta variable en función de la aparición o no de un estrato competente de roca sana durante la perforación del pilote.

Las arcillas de las Facies Keuper sobre las que se cimentan de forma profunda las pilas centrales 2 y 3, son de plasticidad media y consistencia dura y presentan intercalaciones de yeso, cuarzos bipiramidales e incluso brechas yesíferas y lutíticas.

Ambos encepados presentan forma tronco piramidal de 27.6 m de anchura, 24 m de longitud y canto variable de 3 a 6 m y se apoyan sobre 56 pilotes de 35 m de profundidad, distribuidos 8 en sentido transversal y otros 7 en sentido longitudinal, de 1.5 m de diámetro, separados entre sí 3.6 m.

La pila 4 y el estribo 2 se cimentan de forma superficial sobre la Formación Buntsandstein, formada por una alternancia de areniscas y limolitas de color rojizo en estado inalterado, con una tensión admisible de 6 kp/cm².

realizado mediante una sucesión de 5 vanos, de luz central 175 m, luces contiguas 155 m y luces laterales de 110 y 126 m.

La sección transversal del tablero, de 26.1 m de anchura, está constituida por un cajón unicelular de almas inclinadas y canto variable de forma parabólica en todos los vanos, siendo éste máximo en pilas, de valor 11.0 m, y mínimo en los centros de vano y en las zonas de canto constante, cercanas a estribos, de valor 4.3 m. Para completar la anchura total del tablero se disponen traviesas transversales, de 0.5 m de espesor, separadas cada aproximadamente 5.0 m, tanto en sendos voladizos como en el interior de la losa superior del cajón, con canto máximo de 1.1 m, y en la losa inferior, en las zonas donde su espesor es menor de 0.6 m, con canto constante de 0.6 m.

El valor constante de la inclinación de las almas y de la anchura superior del cajón a lo largo de todo el viaducto, y la variación del canto, tienen como consecuencia que la anchura de la tabla inferior del tablero sea variable, adoptando un valor de 7.1 m en las zonas de canto máximo y de 11.9 m en las zonas de canto mínimo.

Las pilas se encuentran empotradas al tablero y están resueltas mediante secciones transversales de tipo rectangular huecas, de paredes delgadas y aristas redondeadas. En la parte superior, en donde la geometría se mantiene constante, el valor del ancho y del canto es de 7.1 y 6.7 m respectivamente. Dichas zonas superiores tienen una altura de 28 m en las pilas centrales 2 y 3, y de 16 m en las pilas laterales 1 y 4. A partir de estas secciones, la anchura y el canto de las mismas, se mantiene variable, aumentando las secciones de las bases en función de su altura, 1/40 transversalmente y 1/50 longitudinalmente, en las pilas 1 y 4 y 1/30 transversalmente y 1/40 longitudinalmente, en las pilas 2 y 3, siendo la altura del orden de 50-60 m en las pilas 1 y 4, y del orden de 115-130 m en las pilas 2 y 3. Con todo ello, los alzados tanto transversales como longitudinales, tienen una directriz circular, variando el espesor de las paredes desde 0.6 m en la zona superior hasta 0.65-0.8 m en la base.

5. Descripción del viaducto

El viaducto se resuelve mediante un tablero continuo de hormigón pretensado de 721 m de longitud, de rasante ascendente con pendiente máxima del 5.57%, planta curva de 700 m de radio y peralte del 8%, mate-

6. Construcción del viaducto

Los grandes puentes se han de construir por adición de partes sucesivas, minimizando los medios de ejecución y montaje, de forma que en cada etapa de cons-

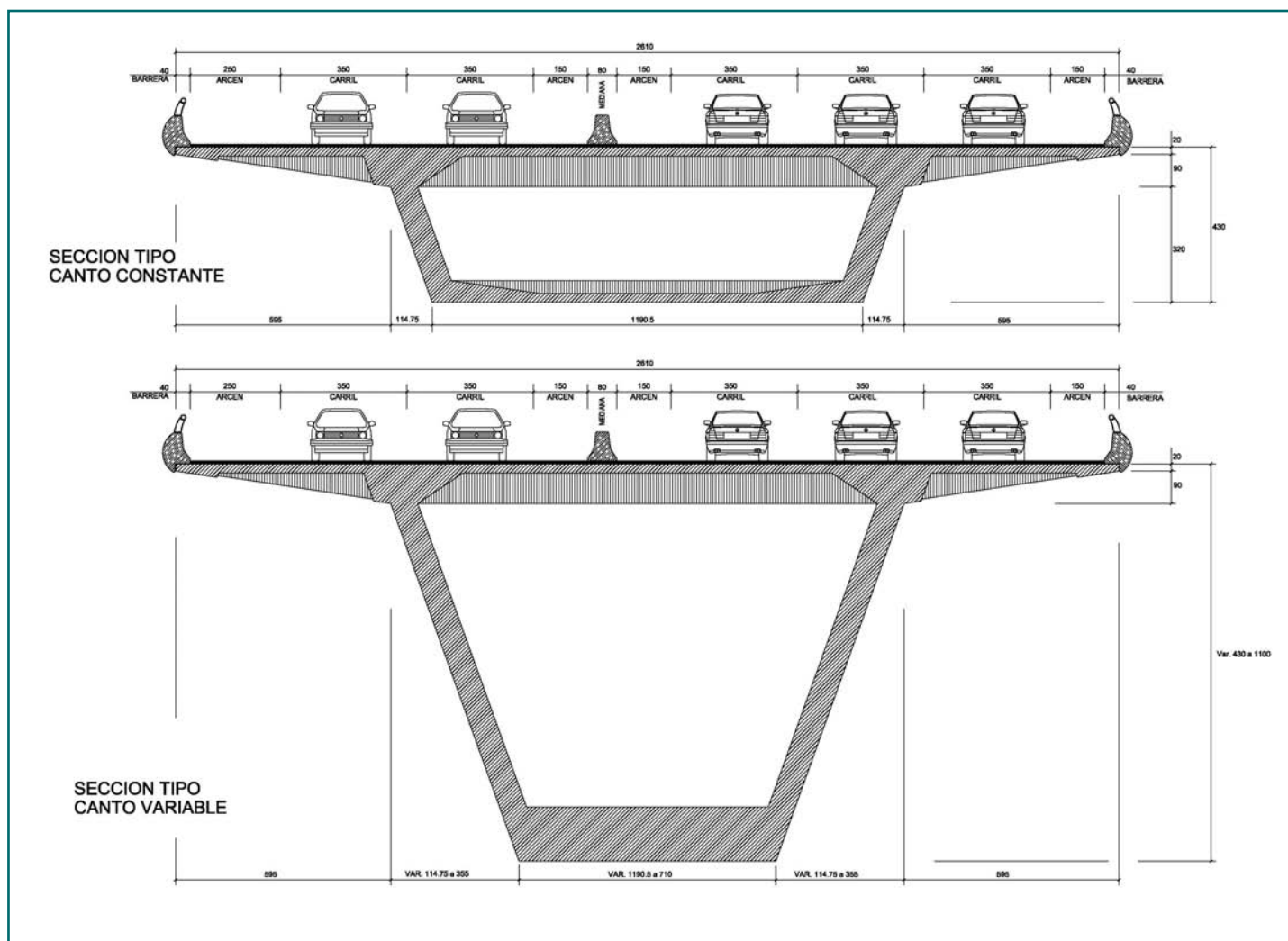


Fig. 4. Sección transversal tipo de tablero.

trucción se cree una estructura parcial que se debe resistir a sí misma y debe permitir la ejecución de la fase siguiente.

Para la construcción de las cuatro pilas de la estructura con variación circular tanto en el alzado transversal como en el longitudinal, en gran parte de su altura, PERI ha definido, para el citado viaducto, las variantes del sistema modular PERI ACS (Automatic Climbing System), desarrollando un sistema innovador a base de una cimbra autotrepante utilizada por primera vez en España en la ejecución de pilas de puentes.

Se trata de un sistema hidráulico denominado 'autotrepa' en donde, con un pórtico colocado sobre las plataformas de trabajo, el encofrado interior y exterior pueden avanzar y retroceder por medio de carros de desplazamiento de forma segura y rápida, con velocidades de elevación en el entorno de los 0.5 m/minuto, permitiendo el encofrado y desencofrado de todas las

trepas de las pilas en cualquier condición meteorológica sin necesidad de grúas externas.

La empresa noruega NRS, con gran experiencia a nivel mundial en la construcción de puentes ejecutados mediante la técnica de avance en voladizo, ha diseñado las parejas de carros de avance a utilizar en la ejecución de las dovelas del tablero. La definición de la sección transversal de anchura 26.1 m resuelta mediante cajón único, las condiciones exigentes de trazado en lo relativo a curvatura en planta, peralte transversal del 8% e inclinación longitudinal del 5.57%, y la necesidad de minimizar el número de dovelas para agilizar de esta forma la ejecución del viaducto, han dificultado en gran medida el diseño de los mismos. Su importante peso (140 Mp) y su gran capacidad de carga (450 Mp), han venido condicionados por la longitud máxima de dovela definida, de peso elevado (420 Mp) y longitud significativa (5 m).

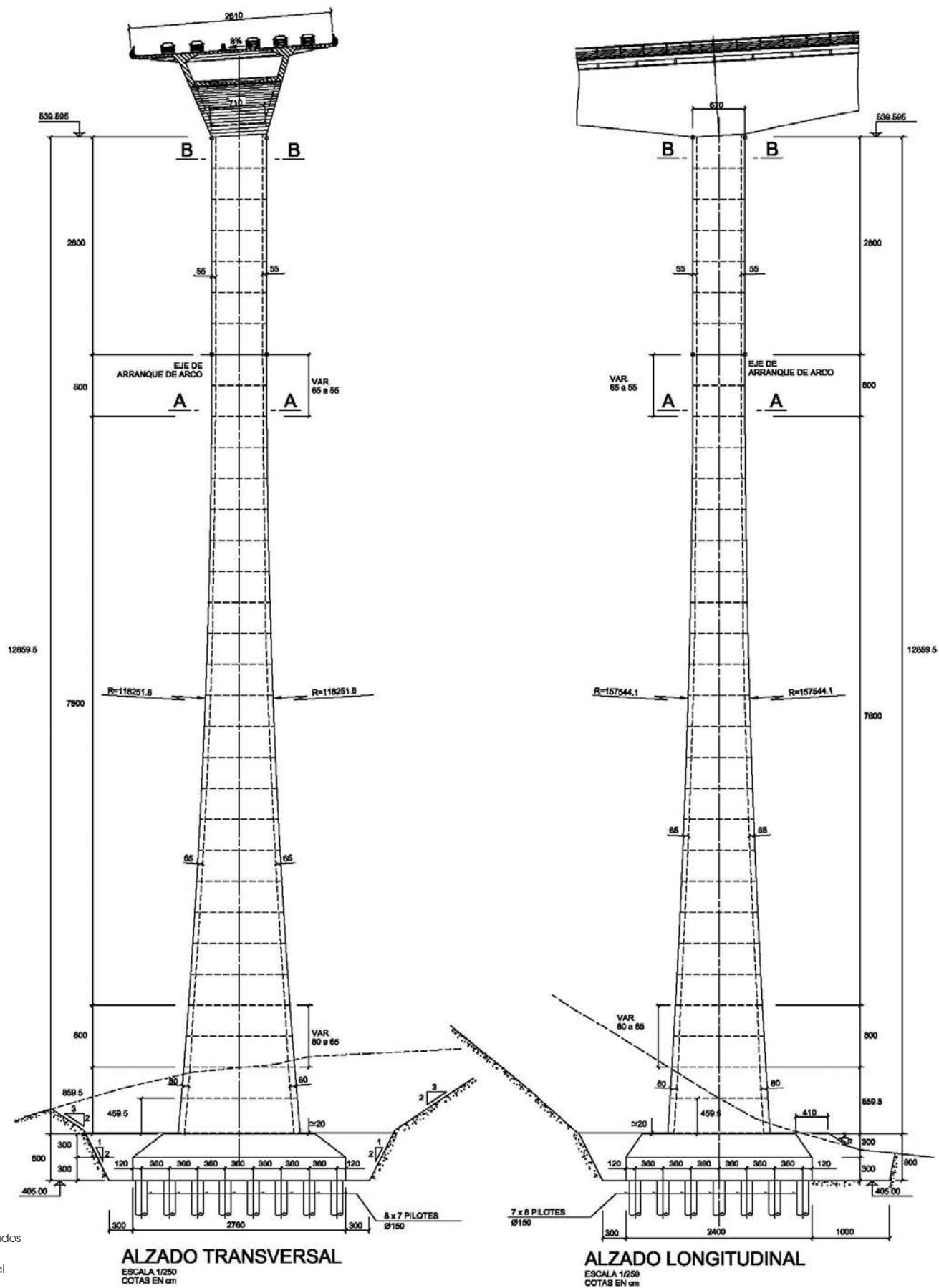


Fig.5. Alzados y sección transversal de pila 2.

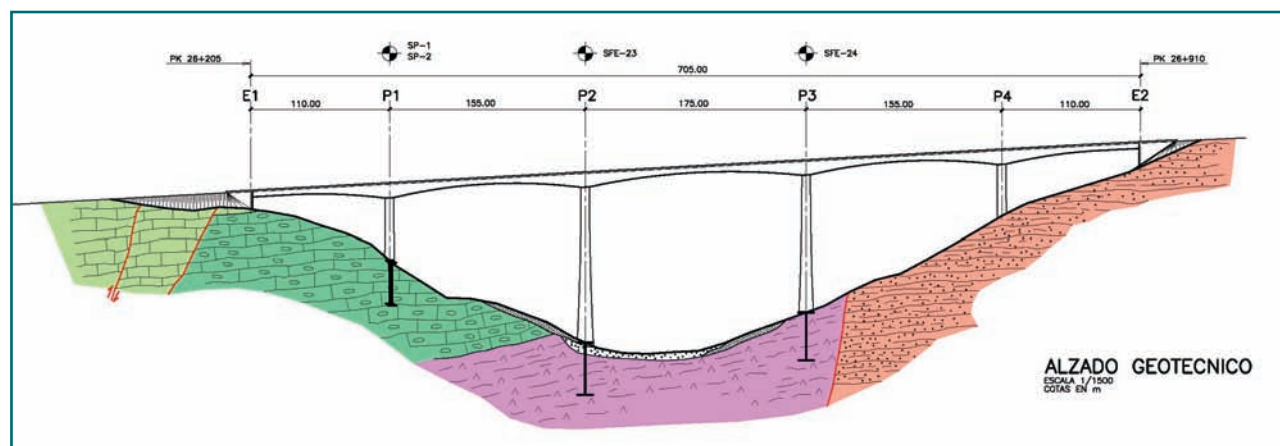


Fig. 6. Perfil geotécnico.

Primeramente se ejecutará la dovela "0" de 7 m de longitud, empotrada a las pilas, para posteriormente instalar la pareja de carros de avance, e ir ejecutando simétricamente las sucesivas dovelas, con el fin de no someter a las pilas a momentos de vuelco elevados.

Esta condición lleva a constituir la obra mediante una serie de vuelos que comportan ménsulas iguales, en donde los esfuerzos axiales y los momentos flectores en las pilas van creciendo de forma continua, tanto porque el peso del dintel es mayor, como porque el efecto de una dovela no equilibrada crece con la distancia a la pila. A la falta de simultaneidad en el hormigonado de las dovelas simétricas hay que añadir los esfuerzos de vuelco que provienen de las imprecisiones de la construcción (diferencia de peso de una ménsula con respecto a la otra), sobrecargas de obra, viento y, eventualmente, incidentes que pueden surgir durante el transcurso de la misma como puede ser la caída del equipo móvil de hormigonado.

Tras la ejecución de las cuatro "Ts" del tablero, las ménsulas se unen entre sí mediante la ejecución de las dovelas de cierre, que aseguran la unión de los voladizos y reestablecen la continuidad de toda la estructura.

7. Instrumentación

Dada la altura y las luces del viaducto se consideró necesario realizar un control de la respuesta estructural del viaducto, a cargo de la empresa Kinesia, tanto durante su construcción como durante su vida útil, bajo las sollicitaciones de viento y tráfico, mediante una instrumentación estática y dinámica con sensores controlados electrónicamente en tiempo real, a través de un sistema de adquisición de datos gobernado por ordena-

dor, orientado a la caracterización de las acciones térmica y eólica.

La parte estática del sistema instrumental de medida registra periódicamente, mediante lectura automática (cada 15 minutos), el estado de la estructura, pudiéndose registrar manualmente las operaciones puntuales que se consideran necesarias (avance de carros, hormigonado de trepas y dovelas, etc...) o, en su caso, intensificar las lecturas automáticas cuando se hace una operación determinada e interesa registrar con de-



Fig. 7. Vista de los pilotes de la cimentación de la pila 2.



Fig. 8. Perspectiva del viaducto.

Fig. 9. Ejecución de trepas de pilas mediante autotrepa.



talle la evolución de una medida. Todos los registros quedan almacenados en una base de datos, la cual es accesible en tiempo real vía internet, para su posterior utilización. Para ello se establece una conexión mediante antena parabólica, con dirección IP fija, un lugar de instalación de los sistemas de medida ubicado de forma permanente en el interior de la pila 2 y, provisionalmente, en el interior de todas las pilas mediante conexiones wi-fi, energía eléctrica continua y el acceso a los puntos de instrumentación mediante cableado, el cual, una vez construido el viaducto se reutilizará y colocará por el interior de las pilas y del tablero para realizar la instrumentación permanente del viaducto. La instrumentación dinámica funciona de forma independiente, mediante capturas automáticas ante eventos que superan los umbrales de disparos prefijados (cuando la velocidad del viento o la aceleración de algún punto estructural superen ciertos valores).

8. Ensayos y estudios de detalle

8.1. Ensayos de túnel de viento

Dadas las características del viaducto y del valle en que se encuadra, se consideró necesario, en base a determinar con precisión la acción del viento sobre el puente, la realización de dos ensayos con túnel de viento a cargo de la empresa danesa Force Technology, de gran experiencia en este tipo de análisis.

El objetivo del primer ensayo fue establecer los coeficientes aerodinámicos del viento relativos a empuje horizontal, fuerza vertical y momento torsor del tablero del viaducto, así como estudiar la posibilidad de aparición de vórtices o remolinos en el mismo, tanto en fase de construcción -sección cajón-, como en servicio -tablero completo con cajón, voladizos y barreras de seguridad-.



Fig. 10. Ejecución de dovelas de tablero mediante carros de avance.



Fig. 11. Ejecución de dovelas "0" del tablero.

El objetivo del segundo ensayo fue establecer las velocidades principales de viento y la intensidad de turbulencia transversal y longitudinal al valle y al Viaducto de Montabliz, para lo cual se realizó una maqueta en 3D a escala 1:1600 que modelizó la orografía real de la zona en donde se encuadra el viaducto en un área de 65 km².

8.2. Ensayo de anclajes para las cimentaciones de las pilas 2 y 3

Las pilas centrales del viaducto se cimentan mediante pilotes sobre las arcillas sobreconsolidadas del Keuper. Habitualmente, en el cálculo de cimentaciones se establece el valor de la adhesión en función de parámetros medibles de muestras extraídas en sondeos, mediante correlaciones empíricas entre la cohesión y la adhesión existentes en los manuales de cimentación. Con el objeto de realizar un dimensionamiento racional de los pilotes, a partir de un conocimiento directo del comportamiento de la interacción estructura-terreno, y por tanto de la adhesión pilotes-arcilla, se realizó, a cargo de la empresa ISR, un ensayo de anclajes a diferentes profundidades, en las proximidades de la pila 3, mediante 6 anclajes de pretensado de 4 de 0.6". Las longitudes libres variaron desde 10 hasta 35 m y los anclajes fueron alojados en perforaciones de 0.15 m de diámetro, con zonas de bulbo, de 0.125 m de diámetro y 5 m de longitud.

8.3. Estudios de detalle

Los elevados esfuerzos que origina un viaducto de estas características, unido a las incertidumbres propias de la heterogeneidad e irregularidad de la Formación Calcárea J1 del Jurásico sobre el que se cementa la pila 1, así como la compleja caracterización de las arcillas de las Facies Keuper sobre las que se cimentan de forma profunda las pilas centrales 2 y 3, hicieron necesario realizar un estudio detallado de sus condiciones de cimentación. De cara a evaluar el factor de seguridad de la cimentación planteada, desde un punto de vista tanto de estabilidad de la ladera en la pila 1, como de cargas sobre los pilotes en las pilas 1, 2 y 3, se encargó a ITASCA Consultores la realización de una modelización numérica para su análisis.

La idea fundamental en la que se apoyó el trabajo consistió en poner a punto, en primer lugar, un mo-

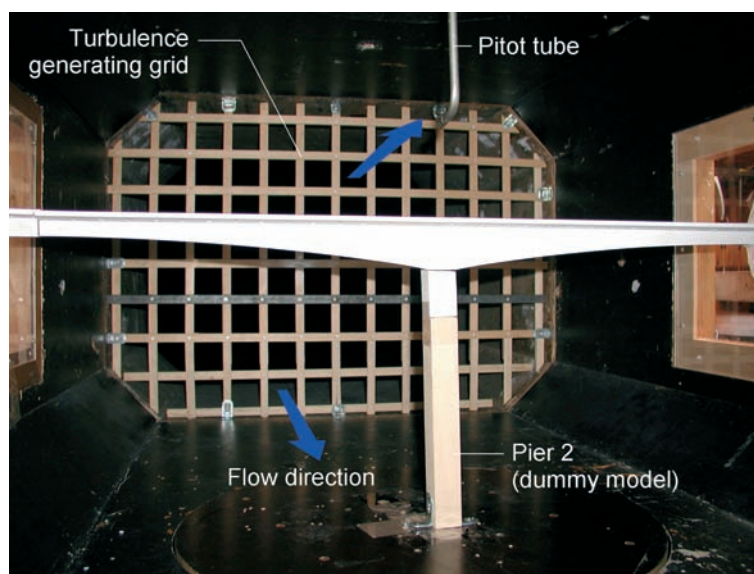


Fig. 12. Ensayo de la "T" correspondiente a la pila 2 en el túnel de viento.

delo numérico con el programa FLAC que reprodujera de forma verosímil el comportamiento carga-deformación de un pilote aislado para posteriormente, calibrarlo contra las formulaciones habitualmente empleadas en pilotes y finalmente, extenderlo geoméricamente de cara a estudiar el efecto grupo. Al suponer éste únicamente un cambio en la geometría, y dado que los mecanismos de interacción pilote-terreno y de plastificación del terreno no varían, la simulación del grupo de pilotes que se obtuvo reprodujo de forma satisfactoria el comportamiento de la cimentación.

Para la redacción del proyecto básico del Viaducto de Montabliz, dadas sus dimensiones, se consideró necesario realizar Estudios Especiales a cargo de PRIN-CIPIA, Ingenieros Consultores, en base a estudiar con

Fig. 13. Vista del flujo del viento longitudinal.

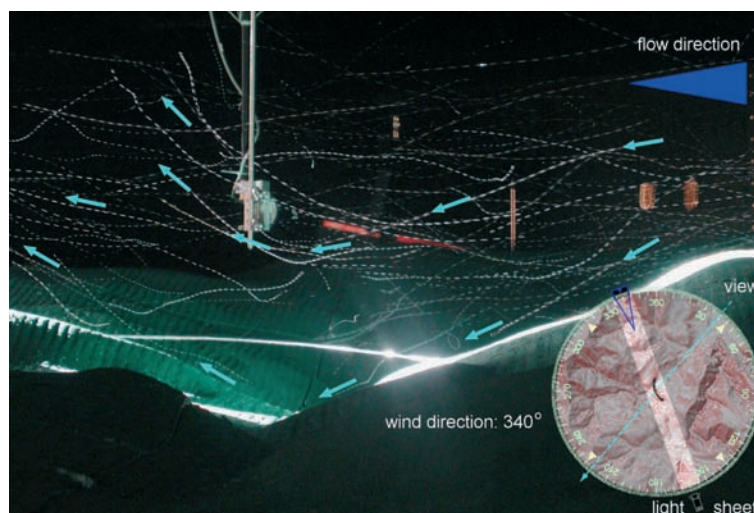




Fig. 14. Vista general de las pilas.

mayor detalle la respuesta del viaducto, en fase de construcción y en servicio, ante solicitaciones excepcionales de sismo, viento y fuego, mediante la utilización del programa ABAQUS.

Para el estudio del viento, dado que se trata de una carga ambiental que solicita de forma aleatoria la estructura, se realizó un estudio mediante análisis espectral teniendo en cuenta los efectos tanto de la no linealidad geométrica como de material. El estudio sísmico realizado incluyó dos tipos de cálculos: un cálculo-modal-espectral en el dominio de la frecuencia, para las fases de construcción y servicio, y un segundo cálculo en el dominio del tiempo, con integración directa de la respuesta del viaducto ante la actuación de una historia de aceleraciones, realizado sobre la estructura completa. En lo referente al estudio térmico, ante la posibilidad de un incendio, se realizó un cálculo de transferencia de calor, en el que se estudió la propagación del mismo en el hormigón de la pila y la posible degradación de la resistencia de las armaduras. ♦

FICHA TÉCNICA

Propiedad

Ministerio de Fomento.
Demarcación de Carreteras del Estado en Cantabria

Ingeniero de Caminos Director de Obra

D. Roberto Villegas Gómez

Empresa Constructora

FERROVIAL-AGROMAN, S.A.

Ingeniero de Caminos Jefe de Obra

D. José Miguel San Millán San Martín

Empresa Consultora y Asesoría Técnica

APIA XXI, S.A.

Ingenieros de Caminos Autores del Proyecto

D. Marcos J. Pantaleón Prieto
D. Roberto Revilla Angulo

Asistencia Técnica

U.T.E TORROJA-URBACONSULT

Instrumentación

KINESIA Ingeniería

Referencias:

- (1) ARENAS DE PABLO, JUAN J. Cálculo de soportes rectangulares de hormigón armado en teoría de segundo orden.
- (2) LEONHARDT, FRITZ. *Estructuras de hormigón armado. Tomos I, II, III, IV, V y VI.*

- (3) LEONHARDT, FRITZ. *Hormigón pretensado.*
- (4) LOPEZ AGÜI, JUAN CARLOS. *Estabilidad de pilares esbeltos. Estado límite último de estabilidad.*
- (5) MANTEROLA, JAVIER. *Curso de puentes de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.*

- (6) MATHIVAT, J. *Construcción de puentes de hormigón pretensado por voladizos sucesivos.*
- (7) Schlaich, Jörg & Scheef, Hartmut. *Concrete-Box-Girder Bridges.*